

草原群落生物量和土壤有机质含量对改良措施的动态响应

张璐¹ 郝乚台¹ 齐丽雪¹ 李艳龙¹ 徐慧敏¹ 杨丽娜² 宝音陶格涛^{1*}

¹内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021; ²太仆寺旗委组织部, 内蒙古锡林郭勒盟 027000

摘要 基于1983年开始的改良恢复长期观测试验, 研究了在排除干扰的围封保护下, 不同恢复改良措施对内蒙古退化羊草 (*Leymus chinensis*) 草原群落地上生物量和土壤有机质含量动态变化过程的影响, 改良恢复措施包括浅耕翻、耙地和自然恢复。结果表明: (1) 地上生物量在前期(1983–1991年)的动态变化特征为自然恢复处理显著低于浅耕翻处理, 耙地处理与其余两个处理没有显著差异。中期(1992–2006年)各处理之间无显著差异; 后期(2007–2014年)为自然恢复>耙地>浅耕翻, 且自然恢复与浅耕翻处理之间有显著差异。(2) 0–10 cm土壤有机质含量在前期的动态变化特征为浅耕翻>耙地>自然恢复, 且处理之间有显著差异, 自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年土壤有机质分别增加了21%、45%、37%; 中期和后期自然恢复处理显著大于浅耕翻处理, 耙地处理介于两个处理之间且与二者没有显著差异。中期自然恢复、浅耕翻、耙地处理有机质含量相对1983年分别增加了61%、46%、57%, 后期分别增加了67%、51%、62%。(3) 10–30 cm土壤有机质在前期浅耕翻>自然恢复>耙地, 且各处理之间有显著差异; 中期和后期各处理之间无显著差异。总之, 应依据恢复目标的不同, 选择不同的改良措施。在短时间尺度上, 浅耕翻有利于退化羊草草原生产力和土壤有机碳的快速恢复, 而长时间尺度上自然恢复和耙地的效益更明显。

关键词 退化羊草草原; 改良措施; 地上生物量; 土壤有机质含量; 动态变化

张璐, 郝乚台, 齐丽雪, 李艳龙, 徐慧敏, 杨丽娜, 宝音陶格涛 (2017). 草原群落生物量和土壤有机质含量对改良措施的动态响应. 植物生态学报, 42, 317–326. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0046

Dynamic responses of aboveground biomass and soil organic matter content to grassland restoration

ZHANG Lu¹, HAO Bi-Tai¹, QI Li-Xue¹, LI Yan-Long¹, XU Hui-Min, YANG Li-Na, and BAOYIN Taogetao^{1*}

¹College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; and ²Taibus Committee Organization Department, Xilin Gol League, Nei Mongol 027000, China

Abstract

Aims Based on a long-term observation experiment set up in 1983, which was designed to test how different restoration measures would affect the aboveground biomass and soil organic matter content in a degraded *Leymus chinensis* steppe in Nei Mongol, under the enclosure protection from interference. Our restoration measures included shallow plowing, harrowing and natural restoration.

Methods This experiment used the quadrat method (five replicates) to survey the aboveground biomass and the potassium dichromate oxidation volumetric method to analyze soil organic matter content.

Important findings Results showed that the changes of aboveground biomass in the early period (1983–1991) were significantly higher under shallow plowing treatment than under natural restoration, while those under the harrowing treatment were not significantly different from those under the rest two treatments. In the middle period (1991–2006), there the three treatments had no significant different changes of aboveground biomass. In the late period (2006–2014), the changes of aboveground biomass were in the order of natural restoration > harrowing > shallow plowing, while the difference was significant between natural restoration and shallow plowing. The changes of soil organic matter content in the 0–10 cm soil layer in the early period was significantly different under different treatments and was in the order of shallow plowing > harrowing > natural restoration. Compared to

收稿日期Received: 2017-02-27 接受日期Accepted: 2017-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(31160138)、内蒙古自治区自然科学基金(2005ZD05)、国家科技支撑计划(2015BAC02B00)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050400)。Supported by the Natural Science Foundation of China (31160138), the Natural Science Foundation of Nei Monggol Autonomous Region, China (2005ZD05), the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAC02B00) and the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA05050400).

* 通信作者Corresponding author (bytgt@sohu.com)

the initial value (1983), natural restoration, harrowing, and shallow plowing treatments increased soil organic matter content by 21%, 45%, and 37% respectively. In middle and late period, natural restoration increased soil organic matter content significantly more than shallow plowing did, while harrowing treatment result was between the two treatment results and was not significantly different from natural restoration and shallow plowing. Natural restoration, harrowing, shallow plowing increased soil organic matter content by 61%, 46%, and 57% respectively in the middle period and by 67%, 51%, 62% in the later period. The changes of soil organic matter content in the 10–30 cm soil layer in the early period was significantly different under different treatments and was in the order of shallow plowing > natural restoration > harrowing. In middle and late periods, there was no significant difference among treatments. In summary, different improvement measures should be chosen according to the objectives of recovery. On a short time scale, shallow plowing is beneficial to the rapid restoration of productivity and soil organic carbon content in the degraded *Leymus chinensis* steppe, while the benefit of natural restoration and harrowing is more obvious on a longer time scale.

Key words degraded *Leymus chinensis* steppe; improving measures; aboveground biomass; organic matter content in soil; dynamic change

Zhang L, Hao BT, Qi LX, Li YL, Xu HM, Yang LN, Baoyin T (2018). Dynamic responses of aboveground biomass and soil organic matter content to grassland restoration. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 317–326. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0046

草地生态系统是我国的第一大陆地生态系统,所以对草地生态系统的利用关乎国计民生。随着经济的快速发展,对草地的利用出现了诸多不合理的地方。锡林郭勒草原我国北方的主要草原区,退化草原占该草原总面积的64% (宝音陶格涛等, 2003)。基于这种现状,科学家们提出了诸多应对草原退化的改良措施,不同改良措施对不同程度、不同地域和不同利用方式的退化草地产生的效果不同,随着时间的推移在各时间段产生的作用也不同,因此因地制宜地选择改良措施对于当地草场的恢复甚至整个生态系统的恢复显得尤为重要。

放牧是草原生态系统的一种主要利用方式,重度放牧下带来草原植被的破坏,进而导致土壤肥力下降,由此产生一系列的生态效应和环境恶化,对人类生产生活带来一系列的影响;而植被的恢复会带来土壤肥力的恢复。土壤肥力的变化在很大程度上表现为土壤有机质含量的变化(许中旗等, 2006)。植物群落的变化总是与土壤的演化相关联,土壤的分异会导致植被的变化,植被的变化又会影响土壤发育(卢其明等, 1997)。植被特征和土壤环境的关系是生态学研究的重要领域,主要涉及植物群落演替特征、土壤特征的差异(曲国辉和郭继勋, 2003)。退化草地改良恢复,除在提高草地生产力、恢复草地环境和草地功能的正常发挥、维持区域性生态系统平衡等方面有极其重要的作用外,对草地土壤养分也有重要的影响,而这种影响的程度有多大是一个并不十分清楚的问题。因此本研究选择草地群落恢复措施对土壤有机质含量的影响作为研究目的,以期

通过研究探明植被恢复对土壤有机质含量的影响。一直以来,科学家们热衷于对草地改良措施的研究以及改良措施下植物群落生物量及群落组成的影响,而对于改良措施下植物群落和土壤有机质含量在时间序列上的动态研究还很少涉及(龚容等, 2016; 李静鹏等, 2016)。所以本文选取内蒙古典型草原区退化草地为研究对象,对1983–2014年的3个时间段的监测数据进行分析,以此来说明在排除干扰的围封保护下,不同改良措施在32年恢复过程中,植物群落地上生物量及土壤有机质含量的动态变化特征。以此来揭示不同改良恢复方式下的改良效果及改良影响的时间,多方位评价草地改良技术,探讨对退化草地适宜的生态修复技术。研究结果对草原区生态环境的改善和牧区经济的发展具有重要意义。同时对土壤碳的固定和全球温室效应的减缓也有着积极的作用。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于内蒙古锡林郭勒盟中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站(43.5°–44.5° N、116.5°–117.5° E)。属于温带半干旱草原气候,年平均气温–0.4 °C,全年降水分配很不均匀,主要集中于6–9月,占全年降水量的80%。土壤为暗栗钙土。样地在处理前为羊草(*Leymus chinensis*)草原,因过度放牧而退化,植物群落为以冷蒿(*Artemisia frigida*)为建群种的冷蒿+羊草+丛生小禾草群落。植被高度为2–10 cm,盖度为20%左右,单位面积物种丰富度

较低(杨丽娜和宝音陶格涛, 2008)。

1.2 恢复改良措施

于1983年6月下旬在退化样地围栏内进行以下措施, 并且改良措施处理前, 各样地土壤和植被没有显著差异(杨丽娜和宝音陶格涛, 2008)。其中围栏总长650 m, 宽400 m, 每个处理间有5 m隔离带。其中: (1)自然恢复(400 m × 150 m): 围栏保护, 不做任何处理, 依据群落自我恢复力进行恢复。分为150 m × 50 m 7个部分, 并且每个重复间有5 m的隔离带, 选取中间5个部分作为取样区。(2)浅耕翻改良(400 m × 75 m): 用农用四划犁耕翻, 深度为18–20 cm, 接着用镇压器镇压1次。分为75 m × 50 m 7个部分, 并且每个重复间有5 m的隔离带, 选取中间5个部分作为取样区。(3)耙地改良: 即用42片圆盘耙呈45°角对耙两遍, 深度为8–10 cm, 接着用镇压器镇压1次。分为75 m × 50 m 7个部分, 并且每个重复间有5 m的隔离带, 选取中间5个部分作为取样区。

1.3 取样和测定方法

(1)植物调查: 1983–2014年每年的8月中旬在不同处理样地5个重复取样区用样方(1 m × 1 m)法调查植物的地上生物量。(2)土壤取样: 同期与植物调查相对应, 在1991年、2006年、2014年在植物取样方内用土钻取0–10 cm和10–30 cm两层土壤, 每个样方内取3钻混合作为1个样点的土壤样品。土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾氧化容量法。

1.4 数据分析

数据分析采用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析, Duncan多重比较。回归分析图采用SigmaPlot 12.0绘制。恢复速率计算公式如下:

$$\text{恢复速率}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}) = (O_e - O_o)/t$$

式中, O_e 为终止年份的有机质含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), O_o 为起始年份的有机质含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); t 为时间间隔。

2 结果和分析

2.1 不同改良措施对植物群落地上生物量的影响

三种恢复改良措施横向比较: 由于每年生物量波动较大, 因此本试验选用5年的滑动平均值来表征一个时间段的数值(例如1991年的群落生物量即1987–1991年5年的平均值), 并且用不同时间段(前、中、后期)的靠近土壤有机质含量取值的5年滑动平均值代表这一时间段的生物量。从表1我们可以看到改良第9年(恢复前期)地上生物量浅耕翻处理大于

耙地和自然恢复处理, 且自然恢复与浅耕翻处理二者有显著差异($p < 0.05$), 耙地处理介于这两个处理之间且与二者没有显著差异。1983年原始生物量为75.52 g, 自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了44%、54%、47%; 在改良第24年(恢复中期)各处理之间地上生物量变化较小, 三种改良措施间无显著差异, 自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了58%、59%、65%; 在改良第32年(恢复后期)自然恢复处理大于耙地和浅耕翻处理, 且自然恢复与浅耕翻处理间差异十分显著($p < 0.05$), 耙地处理介于两个处理之间且与二者没有显著差异。自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了73%、61%、68%。总体上可以看出在改良初期自然恢复和耙地处理的生物量明显低于浅耕翻处理, 但是经过32年的演替, 自然恢复和耙地处理的生物量超过浅耕翻处理, 并且从长期效果来看, 自然恢复和耙地处理成为最有利于地上生物量积累的处理。而从短期效果上看, 浅耕翻起到十分明显的作用。

相同改良措施不同时间段比较: 随着时间的增加, 自然恢复处理的地上生物量呈现逐渐增加的趋势, 并且前两个时间段之间变化不很明显, 后期与前、中期差异十分显著($p < 0.05$), 并且相对1983年的生物量, 前、中、后期分别增加44%、58%、73%, 说明在改良初期该处理变化不明显, 在改良后期变化十分显著($p < 0.05$); 其余两个处理则呈波动上升的趋势, 其中浅耕翻处理除了前期有显著的增加外(宝音陶格涛等, 2003), 随着时间的增加生物量基本没有明显的变化, 表现在相对1983年的生物量, 前、中、后期分别增加54%、59%、61%; 耙地处理1991年与2006年、2014年的差异十分显著($p < 0.05$), 并且相对1983年的生物量, 前、中、后期分别增加47%、65%、68%, 可以看出地上生物量随着时间的增加有一个显著增加的过程。

生物量30年(1984–2014年)的变化趋势: 由于生物量的年际变化较大, 所以采用5年滑动平均来避免由于降水造成的生物量的剧烈波动, 由图1可看出浅耕翻处理地上生物量表现出前期生物量快速增长, 并且大于其他两个处理, 但是随着时间的推移, 地上生物量有所下降, 并且出现两个低谷时期, 最终生物量相对稳定在一个水平; 耙地处理和自然恢复处理前期生物量恢复较为缓慢, 中期耙地处理生

物量增加较快, 超过其他两个处理, 到后期自然恢复处理生物量远远超过其他两个处理。从30年的恢复程度来看, 浅耕翻处理在前期优势明显, 随着时间的推移, 耙地处理在中期生物量优势明显, 自然恢复处理在后期最有利于地上生物量的积累, 耙地处理介于其他两处理之间。

为了排除气温和降水对地上生物量的影响, 本研究做了1984–2014年每年5–8月平均气温、年平均气温、5–8月总降水量和年总降水量与每年的生物量的相关性分析(表2)。结果显示除了浅耕翻处理生物量与年总降水量有显著相关性外($p < 0.05$), 其余处理与平均气温和总降水量都没有显著相关性($p > 0.05$), 说明改良措施对生物量的影响在某种程度上大于气候因子对其的影响。

2.2 不同改良措施对土壤有机质含量的影响

三种恢复改良措施横向比较: 如表3所示, 0–10 cm土壤有机质含量在1991年表现为浅耕翻>耙地>自然恢复, 且处理之间差异十分显著($p < 0.05$), 该层1983年原始有机质含量为 $11.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了34%、45%、37%; 2006年和2014年土壤有机质含量自然恢复处理大于耙地和浅耕翻处理, 且自然恢复与浅耕翻处理差异十分显著($p < 0.05$), 耙地处理介于两个处理之间且与二者没有显著差异。2006年自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了61%、46%、57%, 2014年自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了67%、51%、62%。由此可以看出土壤表层有机质改良前期浅耕翻处理效果最佳,

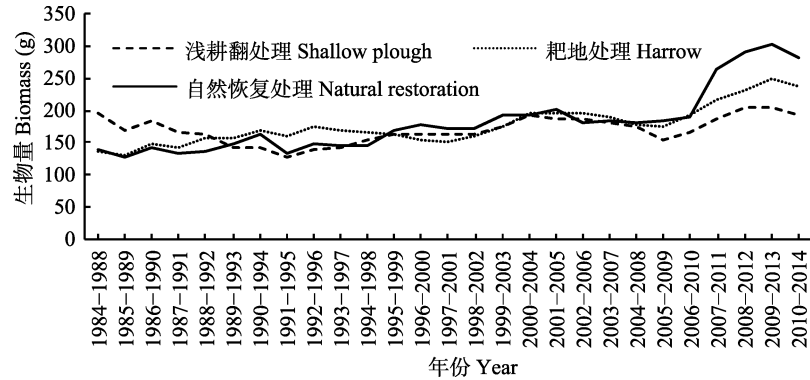


图1 不同处理地上生物量30年的变化趋势。

Fig. 1 Variations of aboveground biomass in the past 30 years under different treatments.

表1 不同改良措施对群落地上生物量的影响(平均值±标准误差)

Table 1 Effect of different restoration treatments on aboveground biomass (mean ± SE)

处理 Treatment	地上生物量 Aboveground biomass ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)		
	前期 Early period (1987–1991)	中期 Middle period (2002–2006)	后期 Latter period (2010–2014)
自然恢复 Natural restoration	$134.15 \pm 9.9^{\text{bB}}$	$180.82 \pm 17^{\text{aB}}$	$281.75 \pm 36.7^{\text{aA}}$
浅耕翻 Shallow plough	$165.85 \pm 9.3^{\text{aA}}$	$185.57 \pm 15.1^{\text{aA}}$	$192.98 \pm 21.5^{\text{bA}}$
耙地 Harrow	$141.56 \pm 8.9^{\text{abC}}$	$197.04 \pm 10.1^{\text{aB}}$	$237.32 \pm 20.6^{\text{abA}}$

不同大写字母表示同一处理不同年份之间的差异显著($p < 0.05$), 不同小写字母表示同一时间段不同处理之间的差异显著($p < 0.05$)。Different capital letters indicate significant differences among different periods under the same treatment at 0.05 level; different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same period at 0.05 level.

表2 不同改良措施生物量与气象数据的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of biomass and meteorological data under different restoration treatments

处理 Treatment		生物量与5–8月平均气温 Biomass and mean air temperature since May to August	生物量与年平均气温 Biomass and mean annual air temperature	生物量与5–8月总降水量 Biomass and total precipitation since May to August	生物量与年总降水量 Biomass and total annual precipitation
自然恢复 Natural restoration	R^2	0.010 9	0.056 3	0.089 1	0.103 3
	p	0.866 7	0.470 8	0.297 2	0.242 3
浅耕翻 Shallow plough	R^2	0.003 8	0.029 6	0.140 0	0.208 0
	p	0.952 1	0.677 0	0.140 7	0.048 3
耙地 Harrow	R^2	0.017 9	0.118 8	0.041 5	0.081 7
	p	0.790 3	0.193 1	0.576 4	0.330 4

随着改良年限的增加自然恢复和耙地处理有明显优势。10–30 cm土壤有机质含量在1991年表现为浅耕翻>自然恢复>耙地,且各处理间差异性十分显著($p < 0.05$),该层1983年原始有机质含量为 $10.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了25%、30%、5%;2006年和2014年土壤有机质含量各处理间差异性较小,2006年自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了48%、31%、42%,2014年自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了38%、25%、37%。可以看出深层土壤前期自然恢复和耙地处理效果明显,随着改良年限的增加受改良措施影响变小。

相同改良措施不同时间段比较:从处理本身演替过程来看,结合表3,0–10 cm自然恢复和耙地处理随着时间的推移土壤有机质含量呈现一个上升的趋势,并且自然恢复处理1991年、2006年、2014年的有机质含量相对1983年分别增加34%、61%、67%,耙地处理1991年、2006年、2014年的有机质含量相对1983年分别增加37%、57%、62%,且1991年有机质含量显著低于与其他两个年份($p < 0.05$)。浅耕翻处理则呈现一个先快速增加后平缓的趋势,并且1991年、2006年、2014年的有机质含量相对1983年分别增加45%、46%、51%,可以看出初期土壤有机质含量快速增长,后期没有明显变化。自然恢复处理和浅耕翻处理在10–30 cm土壤层有机质含量没有明显差异,自然恢复处理的10–30 cm土壤层1991

年、2006年、2014年的有机含量相对1983年分别增加25%、48%、38%;浅耕翻处理的10–30 cm土壤层1991年、2006年、2014年的有机质含量相对1983年分别增加30%、31%、25%;耙地处理的10–30 cm土壤层有机质含量在1991–2006年增加较明显($p < 0.05$),后期有细微的减少,1991年、2006年、2014年的有机质含量相对1983年分别增加了5%、42%、37%。

2.3 不同改良恢复对有机质恢复速率影响

0–10 cm土壤有机质从恢复速率上来看(表4),第一阶段浅耕翻处理最大达 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,自然恢复最小为 $0.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,但是后面两个阶段自然恢复处理最大达到0.86和 $0.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,浅耕翻最小为0.01和 $0.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,并且32年的平均恢复速率也呈现相同的变化趋势,说明自然恢复处理从长期来看是对土壤表层有机质最好的恢复措施,浅耕翻处理是短期的快速恢复措施。10–30 cm土壤有机质从恢复速率上来看(表5),第一阶段浅耕翻处理的恢复速率大于其他两个处理达 $0.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,第二阶段耙地处理的恢复速率大于其他两个处理达 $0.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,但是第三阶段和32年平均速率依然是自然恢复处理最大达0.41和 $0.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.4 不同改良措施下土壤有机质含量与群落地上生物量之间的关系

2.4.1 不同改良措施下土壤有机质含量与群落地上生物量的变化趋势

综合上述分析可以得出:从各处理随着时间的

表3 不同改良措施下土壤有机质含量(平均值±标准误差)

Table 3 Soil organic matter content under different restoration treatments (mean ± SE)

土层深度 Soil depth(cm)	年份 Year	不同处理土壤有机质含量 Soil organic matter content under different treatment ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
		自然恢复 Natural restoration	浅耕翻 Shallow plough	耙地 Harrow
0–10	1991	$17.14 \pm 0.3^{\text{cB}}$	$21.24 \pm 0.2^{\text{aA}}$	$18.37 \pm 0.5^{\text{bB}}$
10–30		$14.67 \pm 0.5^{\text{bB}}$	$15.60 \pm 0.2^{\text{aA}}$	$11.50 \pm 0.09^{\text{cB}}$
0–10	2006	$30.04 \pm 0.7^{\text{aA}}$	$21.42 \pm 2.4^{\text{bA}}$	$27.12 \pm 2.8^{\text{abA}}$
10–30		$20.98 \pm 2.4^{\text{aA}}$	$15.96 \pm 1.8^{\text{aA}}$	$18.86 \pm 2.8^{\text{aA}}$
0–10	2014	$35.25 \pm 5.8^{\text{aA}}$	$23.65 \pm 1.1^{\text{bA}}$	$30.70 \pm 1.4^{\text{abA}}$
10–30		$17.69 \pm 1.3^{\text{aAB}}$	$14.63 \pm 0.5^{\text{aA}}$	$17.40 \pm 1.0^{\text{aA}}$

不同大写字母表示同一处理不同年份之间的差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一时间段不同处理之间的差异显著($p < 0.05$)。

Different capital letters indicate significant differences among different periods under the same treatment at 0.05 level; different lower case letters indicate significant differences among different treatments in the same period at 0.05 level.

表4 不同改良措施下0–10 cm土壤有机质的恢复速率

Table 4 Recovery rate of soil organic matter content (0–10 cm) under different restoration treatments

处理 Treatment	土壤有机质的恢复速率 Recovery rate of soil organic matter content ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)			
	1983–1991年 During 1983–1991	1991–2006年 During 1991–2006	2006–2014年 During 2006–2014	32年平均速率 Average rate of 32 year
自然恢复 Natural restoration	0.69	0.86	0.65	0.76
浅耕翻 Shallow plough	1.20	0.01	0.28	0.39
耙地 Harrow	0.84	0.58	0.45	0.61

表5 不同改良措施下10–30 cm土壤有机质的恢复速率
Table 5 Recovery rate of soil organic matter content (10–30 cm) under different restoration treatments

处理 Treatment	土壤有机质的恢复速率 Recovery rate of soil organic matter content (mg·kg ⁻¹ ·a ⁻¹)			
	1983–1991年 During 1983–1991	1991–2006年 During 1991–2006	2006–2014年 During 2006–2014	32年平均速率 Average rate of 32 year
自然恢复 Natural restoration	0.46	0.42	0.41	0.22
浅耕翻 Shallow plough	0.58	0.02	0.17	0.12
耙地 Harrow	0.07	0.49	0.18	0.21

变化趋势来看, 1987–1991年生物量与0–10 cm有机质含量在各处理的变化趋势相同, 都呈现浅耕翻>耙地>自然恢复, 2010–2014年也呈现相同的变化趋势, 自然恢复处理显著大于浅耕翻处理, 耙地处理介于二者之间, 但与其他两个处理没有显著差异。在三个时间段10–30 cm土壤有机质含量的变化趋势与生物量不一致。说明从长期改良措施来看, 群落地上生物量与0–10 cm土壤有机质含量改良措施的响应基本一致。综合来看群落地上生物量的大小和0–10 cm土壤有机质含量相关性更密切。

2.4.2 不同改良措施下土壤有机质含量与群落地上生物量二者的回归分析

土壤有机质含量与地上生物量之间相互影响, 因此采用回归分析, 这里的曲线方程是经过多种模拟方程比较, 模拟效果较好的多项式方程, 以表征二者之间的关系(图2–7)。这里的生物量为前5年的滑动平均值表征某一时段的生物量值, 每一个生物量值对应5个有机质含量值(5个重复), 由图2和图3可以看出自然恢复处理0–10 cm和10–30 cm土壤有机质含量与生物量高度拟合, 二者具有显著相关性($p < 0.05$), 表现出来0–10 cm土壤有机质含量随着生物量的增加也在不断地增加, 10–30 cm土壤有机质含量随着生物量的增加也在增加, 但是生物量增加到一定的程度(大约200 g·m⁻²)土壤有机质含量呈现下降的趋势。

由图4和图5可以看出, 浅耕翻处理在0–10 cm有机质含量与生物量拟合程度较高, 二者具有显著相关性($p < 0.05$), 表现在随着生物量的增加, 有机质含量也在增加; 生物量与10–30 cm土壤有机质含量拟合程度较低, 不具有显著相关性($p > 0.05$), 表现出开始随着生物量的增加, 土壤有机质含量也在增加, 但是生物量增加到一定程度(大约160 g·m⁻²)有机质含量在减少。

由图6和图7可以看出, 耙地处理在0–10 cm和10–30 cm土壤有机质含量和地上生物量高度拟合, 二者具有显著相关性($p < 0.05$), 表现出随着生物量

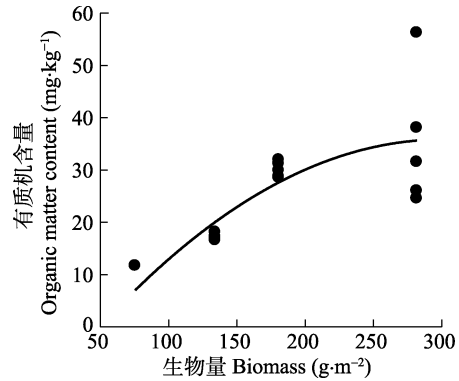


图2 自然恢复处理0–10 cm土壤有机质含量与生物量的关系。
Fig. 2 The relationship between soil organic matter content (0–10 cm) and aboveground biomass under natural restoration treatment.

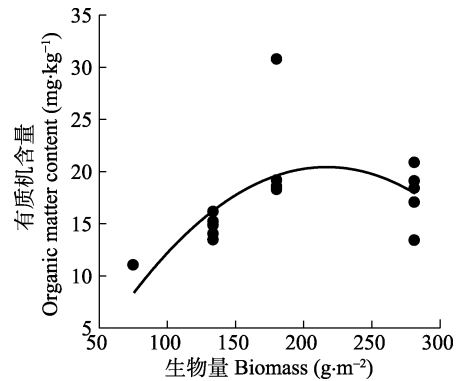


图3 自然恢复处理10–30 cm土壤有机质含量与生物量的关系。
Fig. 3 The relationship between soil organic matter content (10–30 cm) and aboveground biomass under natural restoration treatment.

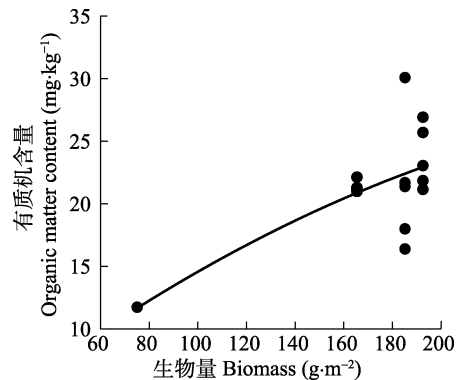


图4 浅耕翻处理0–10 cm土壤有机质含量与生物量的关系。
Fig. 4 The relationship between soil organic matter content (0–10 cm) and aboveground biomass under shallow plough treatment.

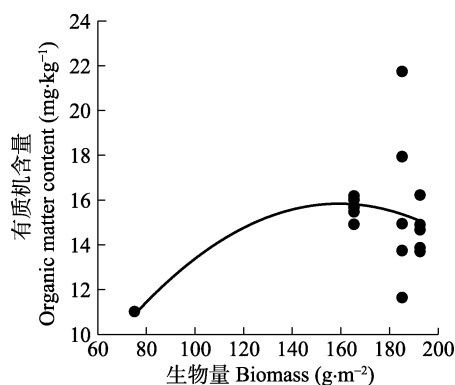


图5 浅耕翻处理10–30 cm土壤有机质含量与生物量的关系。
Fig. 5 The relationship between soil organic matter content (10–30 cm) and aboveground biomass under shallow plough treatment.

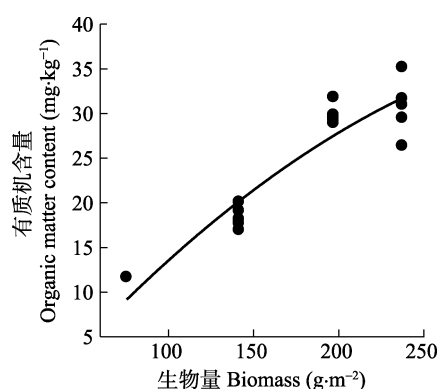


图6 耙地处理0–10 cm土壤有机质含量与生物量的关系。
Fig. 6 The relationship between soil organic matter content (0–10 cm) and aboveground biomass under harrow treatment.

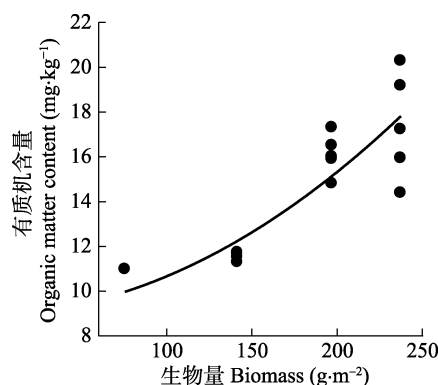


图7 耙地处理10–30 cm土壤有机质含量与生物量的关系。
Fig. 7 The relationship between soil organic matter content (10–30 cm) and aboveground biomass under harrow treatment.

的增加, 土壤有机质含量也在不断增加。

3 讨论和结论

3.1 讨论

3.1.1 群落特征的动态变化对土壤有机质含量的影响

以前对退化草地的研究大多都倾向于土壤对植

物群落的影响(赵菲等, 2011), 而对植物群落和土壤关系的动态却很少研究, 本研究在探讨不同改良措施对植物群落和土壤有机质含量单独的影响后, 在时间尺度上探讨群落特征的变化对土壤有机质含量的影响。有研究表明, 较大区域尺度内土壤碳、氮等营养元素含量的变化受气候、成土母质和水文条件等影响比较大, 而在较小区域范围内主要受地表植物群落类型的影响(白军红等, 2002)。也有研究表明植被与土壤的互动效应体现在诸多方面, 如土壤为植物生长提供水分和养分以及矿质元素, 植物通过吸收和固定 CO_2 、群落生物量的积累和分解等, 使得土壤养分在时间和空间尺度上出现了各种动态变化过程(万猛等, 2008; 刘丽丽等, 2010; 杨小林等, 2010)。在植被群落演替过程中, 群落结构和群落地上生物量会发生一系列的变化(杜峰等, 2007; 王长庭等, 2010; 张婷等, 2011), 这一系列变化又会引起土壤组成尤其是土壤有机质含量相应的变化。大量研究结果表明没有植被的恢复就没有土壤肥力的恢复, 植被群落的恢复是土壤肥力恢复的前提条件, 这一影响主要体现在土壤表层, 这一点在本文中表现很明显(Matuszewski *et al.*, 2010; 乌云娜等, 2012; 张全军等, 2012)。

本研究从植物地上生物量的恢复反映到土壤有机质的恢复上来, 体现了二者的协同作用和植被的导向作用。随着植物群落生物量的恢复, 3种处理下土壤表层有机质含量也逐渐增加。3种处理下植物群落建群种随着时间的推移, 由冷蒿变为羊草, 主要优势种也由冷蒿等耐旱植物逐渐演变为冰草(*Agropyron cristatum*)、针茅(*Stipa capillata*)、薹草(*Carex* spp.)等多年生丛生禾草和根茎禾草(杨丽娜和宝音陶格涛, 2008), 这些群落结构的改变引起群落生物量的变化, 初期以冷蒿为建群种的群落生物量较低, 随着多年生丛生禾草和根茎禾草的重要值的增加, 群落生物量也呈现明显的增长趋势, 并最终体现到土壤有机质含量上来。本研究不同处理随着时间的推移, 生物量和土壤表层有机质含量有着相同的变化特征, 自然恢复处理和耙地处理随着时间的推移, 生物量与表层土壤有机质相对应, 呈现不断地增加的趋势; 浅耕翻处理生物量前期增加较明显, 随后变化不明显, 与土壤表层有机质含量相对应。这些都体现了这一点。

3.1.2 3种改良措施随时间尺度变化的差异化分析

对于退化草地, 根据恢复目标的不同有不同的改良措施(李雅琼等, 2016), 本研究所采用的3种恢复措施是比较常用的改良措施, 因本研究旨在研究不同恢复措施下植物群落与土壤有机质含量的变化这一对生产力最直接的影响指标, 由此选取最贴近生产的改良措施。总的来看3种恢复措施都使植物群落得到了恢复, 群落建群种已经由原来的冷蒿恢复成羊草(杨波和宝音陶格涛, 2014)。前期浅耕翻处理有明显的改良优势, 但是随着时间的推移, 其优势逐渐下降, 这体现了人为干扰下的急速恢复效应。有关土壤养分恢复, 张伟华等(2000)的结果显示经过8年的改良恢复, 浅耕翻的效果明显高于自然恢复处理, 本研究结果与之一致。土壤有机质含量短期内快速恢复, 我们认为主要是前期翻耕改善了土壤的团聚体结构和孔隙度, 进而改变了土壤水分状况并且利于有机质的快速积累。He等(2012)也对翻耕对于土壤有机质含量的影响进行了研究, 其结果显示经过长期的翻耕, 土壤表层碳储量有显著的下降, 由此可以看出频繁的翻耕, 土壤有机质含量会出现下降的趋势, 本试验结果显示土壤表层有机质含量经过一次耕翻处理, 32年后0–10 cm和10–30 cm土层土壤有机质含量相对1991年基本不变, 由此可以看出浅耕翻处理在改良第9年到改良第32年期间土壤有机质含量相对稳定, 没有出现持续的下降, 对于持续的翻耕处理下土壤有机质含量下降的原因很多学者都做出了说明, 主要是翻耕开垦一方面导致表层土壤发生混合过程, 使耕地表层土壤中的有机质均一化, 另一方面, 增加了土壤的通气状况, 有机质的矿化分解迅速且彻底, 不利于有机质的积累, 并可引起土壤养分的流失(陈小花等, 2015), 不仅如此, 在好的环境下, 土壤中有机质的矿质化过程更为普遍地发生, 使有机态物质中所含有的碳、氮、磷等元素被分解、氧化、转变为无机态物质, 从而降低了耕地土壤有机质含量(张成娥和陈小丽, 1996)。从本试验可以看出, 浅耕翻处理相对于持续的翻耕对土壤有机质积累更为有利, 但是从长期来看, 最有利于群落地上生物量恢复的措施还是自然恢复和耙地处理, 这与唐鸿宇等(2007)的结论相一致, 但是短期的快速恢复效应还是浅耕翻效果明显。

大量研究表明人为扰动对深层土壤养分的影响

没有十分明显的规律(许中旗等, 2006), 这点在本研究中也有所体现, 各处理间随着时间的增加10–30 cm土壤有机质含量并没有明显的规律性变化, 且植物群落对于0–10 cm土壤有机质含量的作用很明显, 但是对10–30 cm作用却较弱, 总的来说这些改良措施对土壤表层的作用更强, 对更深层的土壤作用较弱。

3.2 结论

(1)改良第9年(恢复前期)地上生物量浅耕翻处理大于耙地和自然恢复处理, 且自然恢复与浅耕翻处理二者有显著差异($p < 0.05$), 耙地处理介于其他两个处理之间且与二者没有显著差异; 自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年地上生物量分别增加了44%、54%、47%; 在改良第24年(恢复中期)各处理之间地上生物量相互间无显著差异, 相对1983年, 自然恢复、浅耕翻、耙地处理地上生物量分别增加了58%、59%、65%; 在改良第32年(恢复后期)自然恢复处理地上生物量大于耙地和浅耕翻处理, 且自然恢复与浅耕翻处理间差异十分显著($p < 0.05$), 耙地处理介于这两个处理之间且与二者没有显著差异; 自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年地上生物量分别增加了73%、61%、68%。自然恢复和耙地处理长期来看最有利于地上生物量积累, 而浅耕翻在短期恢复措施上起到十分明显的增产作用。

(2) 自然恢复处理地上生物量在改良初期变化不明显, 后期与前中期差异十分显著($p < 0.05$); 浅耕翻处理随着时间的增加, 三个时间段地上生物量基本没有明显的变化; 耙地处理前期的1991年与2006年、2014年的差异十分显著($p < 0.05$)。

(3) 0–10 cm土壤有机质含量在1991年表现为浅耕翻>耙地>自然恢复, 且处理之间差异十分显著($p < 0.05$), 相对1983年, 自然恢复、浅耕翻、耙地处理分别增加了34%、45%、37%; 2006年和2014年自然恢复处理大于耙地和浅耕翻处理, 且自然恢复与浅耕翻处理差异十分显著($p < 0.05$), 耙地处理介于这两个处理之间且与二者没有显著差异; 相对1983年, 2006年自然恢复、浅耕翻、耙地处理土壤有机质含量分别增加了61%、46%、57%, 2014年分别增加了67%、51%、62%。前期浅耕翻处理土壤表层有机质改良效果最佳, 随着改良年限的增加, 自然恢复和耙地处理有明显优势。

10–30 cm土壤有机质含量在1991年表现为浅耕翻>自然恢复>耙地, 且各处理间差异十分显著($p <$

0.05), 自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了25%、30%、5%; 2006年和2014年各处理间差异性较小, 2006年自然恢复、浅耕翻、耙地处理相对1983年分别增加了48%、31%、42%, 2014年分别增加了38%、25%、37%。深层土壤在前期自然恢复和耙地处理效果明显, 随着改良年限的增加受改良措施影响变小。

(4) 自然恢复和耙地处理随着时间的推移0–10 cm土壤有机质含量呈现一个上升的趋势, 且1991年显著低于其他两年($p < 0.05$); 浅耕翻处理则呈现一个先快速增加后平缓的趋势, 1983–1991年土壤有机质含量快速增长, 后期没有明显变化; 自然恢复处理和浅耕翻处理10–30 cm土壤有机质含量几乎没有显著变化; 耙地处理在1991–2006年增加较明显($p < 0.05$), 后期基本没有变化。

(5) 0–10 cm土壤有机质恢复速率第一阶段浅耕翻处理最大达 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 后两个时间段自然恢复最大达 0.86 和 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。10–30 cm土壤有机质恢复速率第一阶段和第三阶段自然恢复处理最大达 0.58 和 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 第二阶段耙地处理最大达 $0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

致谢 感谢中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站的帮助和基金项目的支持。

参考文献

- Bai JH, Deng W, Zhang YX (2002). Spatial distribution of soil organic matter and nitrogen in soil of circular-zonary vegetation areas in Wulanpao Wetland, Inner Mongolia. *Journal of Lake Science*, 14, 145–151. [白军红, 邓伟, 张玉霞 (2002). 内蒙古乌兰泡湿地环带状植被区土壤有机质及全氮空间分异规律. 湖泊科学, 14, 145–151.]
- Baoyin T, Liu ML, Li XL (2003). The study on dynamics succession of community in degenerated steppe of *Leymus chinensis* after shallow ploughing. *Acta Phytoecologica Sinica*, 27, 270–277. [宝音陶格涛, 刘美玲, 李晓兰 (2003). 退化羊草草原在浅耕翻处理后植物群落演替动态研究. 植物生态学报, 27, 270–277.]
- Chen XH, Yu XB, Xue Y, Wang XY (2015). Comparative study on soil dissolved organic carbon nitrogen pool of different forest types in coastal terraces of Wenchang. *Guangdong Agricultural Sciences*, 42(8), 38–43. [陈小花, 余雪标, 薛杨, 王小燕 (2015). 文昌滨海台地不同森林类型土DOC、DON库比较研究. 广东农业科学, 42(8), 38–43.]
- Du F, Liang ZS, Xu XX, Shan L, Zhang XC (2007). The community biomass of abandoned farm land and its effects on soil nutrition in the Loess Hilly Region of Northern Shaanxi China. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 1673–1683. [杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 山仑, 张兴昌 (2007). 陕北黄土丘陵区撂荒草地群落生物量及植被土壤养分效应. 生态学报, 27, 1673–1683.]
- Gong R, Gao Q, Wang YL (2016). Effects of enclosure on community inter-specific relationships in a typical temperate grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 554–563. [龚容, 高琼, 王亚林 (2016). 围封对温带半干旱典型草原群落种间关联的影响. 植物生态学报, 40, 554–563.]
- He NP, Zhang YH, Dai JZ, Han XG, Baoyin T, Yu GR (2012). Land-use impact on soil carbon and nitrogen sequestration in typical steppe ecosystems, Inner Mongolia. *Journal of Geographical Sciences*, 22, 859–873.
- Li JP, Zheng ZR, Zhao NX, Gao YB (2016). Relationship between ecosystem multifunctionality and species diversity in grassland ecosystems under land-use types of clipping, enclosure and grazing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 735–747. [李静鹏, 郑志荣, 赵念席, 高玉葆 (2016). 刈割、围封、放牧三种利用方式下草原生态系统的多功能性与植物物种多样性之间的关系. 植物生态学报, 40, 735–747.]
- Li YQ, Huo YS, Zhao YA, Yang LN, Baoyin T (2016). Effect of different measures for improving degraded grassland on the soil carbon and nitrogen stocks in steppe of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Grassland*, 38(5), 91–95. [李雅琼, 霍艳双, 赵一安, 杨丽娜, 宝音陶格涛 (2016). 不同改良措施对退化草原土壤碳、氮储量的影响. 中国草地学报, 38(5), 91–95.]
- Liu LL, Jin ZX, Li JH (2010). Plant species diversity in *Sinocalycanthus chinensis* community and its correlation with soil factors in Dalei mountain of Zhejiang Province. *Bulletin of Botanical Research*, 30, 57–64. [刘丽丽, 金则新, 李建辉 (2010). 浙江大雷山夏蜡梅群落植物物种多样性及其与土壤因子相关性. 植物研究, 30, 57–64.]
- Lu QM, Lin L, Zhuang XY, Chen HY, Huang YF (1997). Preliminary study on the soil characteristics of different plant communities in Chebailing National Nature Reserve, Guangdong Province. *Journal of South China Agricultural University*, 18(3), 51–55. [卢其明, 林琳, 庄雪影, 陈红跃, 黄永芳 (1997). 车八岭不同演替阶段植物群落土壤特性的初步研究. 华南农业大学学报, 18(3), 51–55.]
- Matuszewski S, Bajerlein D, Konwerski S, Szpilan K (2010). Insect succession and carrion decomposition in selected forests of Central Europe. Part 1: pattern and rate of decomposition. *Forensic Science International*, 194, 85–93.
- Qu GH, Guo JX (2003). The relationship between different plant communities and soil characteristics in Songnen grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 12(1), 18–22. [曲国辉, 郭继勋 (2003). 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系. 草业学报, 12(1), 18–22.]

- Tang HY, Yang XS, Shen JL, Zhang CW, Bai X, Guo RP, Li HL, Wu X (2007). Effect of different improved measures on vegetation and soil fertility of saline-alkali grassland. *Prataculture & Animal Husbandry*, (10), 1–3, 7. [唐鸿宇, 杨晓松, 沈景林, 张成武, 白雪, 郭瑞萍, 李海龙, 武霞 (2007). 不同改良措施对盐碱化草地植被和土壤肥力的影响. 草业与畜牧, (10), 1–3, 7.]
- Wan M, Fan W, Tian DL (2008). Discussion on the relationship between the biomass and volume of *Quercus variabilis* forest at the southern foot of Taihang Mountain. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 36, 1437–1438. [万猛, 樊巍, 田大伦 (2008). 太行山南麓栓皮栎林生物量和材积关系的探讨. 安徽农业科学, 36, 1437–1438.]
- Wang CT, Long RJ, Wang GX, Liu W, Wang QL, Zhang L, Wu PF (2010). Relationship between plant communities, characters, soil physical and chemical properties, and soil microbiology in alpine meadows. *Acta Prataculturae Sinica*, 19(6), 25–34. [王长庭, 龙瑞军, 王根绪, 刘伟, 王启兰, 张莉, 吴鹏飞 (2010). 高寒草甸群落地表植被特征与土壤理化性状、土壤微生物之间的相关性研究. 草业学报, 19(6), 25–34.]
- Wu YN, Luo WT, Huo GW, Lü JZ, Li HS, Hu GW (2012). Micro-scale spatial heterogeneity of vegetation community and soil organic matter under different grazing intensities. *Journal of Desert Research*, 32, 972–979. [乌云娜, 雒文涛, 霍光伟, 吕建洲, 李海山, 胡高娃 (2012). 微生境尺度上放牧退化草原群落特征与土壤有机质的空间分异性. 中国沙漠, 32, 972–979.]
- Xu ZQ, Min QW, Wang YS, li WH, Xu Q (2006). Impact of human disturbances on soil nutrient contents of typical grasslands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(5), 38–42. [许中旗, 闵庆文, 王英舜, 李文华, 许晴 (2006). 人为干扰对典型草原生态系统土壤养分状况的影响. 水土保持学报, 20(5), 38–42.]
- Yang B, Baoyin T (2014). Study on restoration succession of plant community in degenerated *Leymus chinensis* steppe after harrowing for thirty years. *Chinese Journal of Grassland*, 36(2), 36–42. [杨波, 宝音陶格涛 (2014). 退化羊草草原轻耙处理后30年植物群落恢复演替规律研究. 中国草地学报, 36(2), 36–42.]
- Yang LN, Baoyin T (2008). Effect of different improving measures on degenerated steppe of *Leymus chinensis*. *Journal of Desert Research*, 28, 312–317. [杨丽娜, 宝音陶格涛 (2008). 不同改良措施对退化羊草(*Leymus chinensis*)草原的影响. 中国沙漠, 28, 312–317.]
- Yang XL, Zhao KT, Ma HP, Lu SH, Luo J (2010). Ecological studies on vegetation quantity in the semi-arid valley region of Lasa. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(10), 15–22. [杨小林, 赵垦田, 马和平, 禄树晖, 罗健 (2010). 拉萨半干旱河谷地带的植被数量生态研究. 林业科学, 46(10), 15–22.]
- Zhang CE, Chen XL (1996). A study on relation between soil microbial population distribution and soil fertility before and after vegetation destruction. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2(4), 77–83. [张成娥, 陈小丽 (1996). 植被破坏前后土壤微生物分布与肥力的关系. 土壤侵蚀与水土保持学报, 2(4), 77–83.]
- Zhang QJ, Yu XB, Qian JX, Xiong T (2012). Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 3656–3669. (in Chinese with English abstract)[张全军, 于秀波, 钱建鑫, 熊挺 (2012). 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征. 生态学报, 32, 3656–3669.]
- Zhang T, Chen YM, Wu CH (2011). Change of underground biomass and soil fertility with restoration stages of *Artemisia gmelinii* and *Stipa bungeana* in Loess Hilly Region. *Science of Soil and Water Conservation*, 9(5), 91–97. [张婷, 陈云明, 武春华 (2011). 黄土丘陵区铁杆蒿群落和长芒草群落地上生物量及土壤养分效应. 中国水土保持科学, 9(5), 91–97.]
- Zhang WH, Guan SY, Li YJ, Wu YZ (2000). Effect of different restoration measure on the moisture and nutrient of soil of degraded grassland. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 21(4), 31–35. [张伟华, 关世英, 李跃进, 武永智 (2000). 不同恢复措施对退化草地土壤水分和养分的影响. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 21(4), 31–35.]
- Zhao F, Xie YZ, Ma HB, Shen Y (2011). Effects of enclosure on species diversity and soil organic matter of typical steppe. *Pratacultural Science*, 28, 887–891. [赵菲, 谢应忠, 马红彬, 沈艳 (2011). 封育对典型草原植物群落物种多样性及土壤有机质的影响. 草业科学, 28, 887–891.]

责任编辑: 白永飞 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答